

# 相变材料在零能耗太阳能住宅中的应用研究

——以国际太阳能十项全能竞赛作品为例\*

石 峰, 乐 乐

(厦门大学 建筑与土木工程学院 福建 厦门 361005)

**摘要:** 相变材料具有相变潜热大的特性,能够提高轻型围护结构建筑的热稳定性,改善热环境并且节约能耗,在建筑节能领域受到越来越多的关注。主要介绍了相变材料的概况、主要影响因素以及研究现状,并将相变材料应用于建筑的模式分为两种——被动式应用和主动式应用,同时以历届国际太阳能十项全能竞赛的参赛作品为研究对象,对作品中相变材料的应用进行分类研究,以期对绿色建筑设计起到一定的借鉴作用。

**关键词:** 相变材料; 太阳能住宅; 零能耗建筑; 国际太阳能十项全能竞赛

**中图分类号:** TU55 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-7237(2019)03-0035-06

## Applications of Phase Change Material in Zero-energy Houses: The Examples of the Solar Decathlon

SHI Feng, LE Le

(School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

**Abstract:** Phase Change Material (PCM) can improve the thermostability and thermal comfort of lightweight construction houses and save energy because of its high latent heat, which receives increasingly attention in the area of energy-efficient building. This paper introduced an overview of PCM and analyzed different PCM applications in real buildings, which can be divided into two types: passive and active applications. The zero-energy solar residential houses which have participated in Solar Decathlon widely used PCM to improve performance in the competition, so they are selected as main research objects.

**Keywords:** phase change material; solar house; zero-energy buildings; solar decathlon

### 0 引言

目前,我国总能耗中有很大部分来源于建筑能耗,建筑节能已经成为节能减排的重点领域之一,而一种新型的节能建材——相变材料也正逐步地在建筑节能中被尝试使用,利用其蓄热能力强的特性在保证舒适度的同时实现节能的目的。

#### 1 相变材料介绍

##### 1.1 概念介绍

相变材料(Phase Change Material, PCM)能在特定温度下发生物质相态变化,此温度即相变温度,相变时材料将吸收或释放大量的潜热。相变材料在相变过程中的潜热量巨大,并且其相变过程基本上可以

看作是一个等温的过程,因此可用作蓄能材料。在建筑节能、电力系统、工业余热回收、航空科技等方面相变材料逐渐得到了广泛应用。

##### 1.2 相变材料类型

根据相变形式可分为固-固、固-液、固-气和液-气相变。其中,后两者在相变过程中会产生大量气体,体积变化巨大,在建筑工程领域很少使用;固-固相变材料寿命长、制作工艺简单,但是相变温度较高,在建筑中的适用性不高;固-液相变材料的相变潜热较大且相变体积变化相对较小,更适宜用于建筑工程。

根据化学组成可分为有机、无机相变材料和两者的共晶混合物。前者主要包括石蜡、酸酯等,其没有腐蚀性,性能稳定,但导热系数和潜热低,而且易燃;后者主要包括无机盐、水合无机盐、各种金属合金等,

收稿日期: 2018-05-23; 修回日期: 2018-06-28

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308481); 福建省自然科学基金项目(2017J01102)

但只有水和无机盐属于中低温相变材料。优点是导热系数和潜热大,经济性较好,但是存在污染、腐蚀等问题<sup>[1]</sup>。目前,主要应用于建筑领域的是水合盐无机相变材料以及石蜡类、脂肪酸类有机相变材料。

### 1.3 相变材料在建筑应用中的主要影响因素

相变材料的相变过程是在一个极小的温度范围内发生的,如果相变温度不在建筑环境温度范围内,相变材料便完全不能发挥作用;如果相变温度太高或太低,相变材料则利用不充分。所以选择相变温度时应当充分考虑气候环境、建筑用途、相变材料使用目的以及蓄能策略等<sup>[2]</sup>。如果气候变化比较大,可以考虑在建筑中采用不同相变温度的相变材料。

相变材料与建筑材料的主要结合方法有直接渗入法、浸渍法和封装法三种,其中封装法又分为整体封装和微胶囊封装。前两者制作工艺较简单,但存在泄露隐患,不利于长期使用。封装法能有效地防止泄露,整体封装并不改变墙体原有的性质,但要注意钻孔和入钉时不要损坏封装层;微胶囊封装能够加快热传递并且不必担心封装层损坏的问题,但是对墙体力学性能有一定影响<sup>[3]</sup>。

相变材料的应用位置也至关重要。比如在被动式太阳房中,较有效的放置位置是内墙面;在采暖期可放置于地板,其优势是能从室内空气对流换热和阳光直射两方面得热蓄能;也可应用于吊顶,这样可以不受家具、设备等其他因素的影响而降低换热效率,但要考虑热流方向的因素。相变材料的应用位置还应考虑具体的建筑设计、蓄能策略等因素。

除了上述的主要影响因素,相变材料应用的成功与否还与建筑朝向、设备选型、相变材料类型等有关<sup>[4]</sup>。

## 2 研究概况

### 2.1 研究现状

相变材料应用于建筑材料的研究始于20世纪80年代初,国内外关于相变材料的研究至今已取得一定成果。Zalba等人研究了基于昼夜温差较大情况下利用相变材料的自然通风冷却系统,通过实验测量计算出相变材料的投资回收期仅需3~4年<sup>[5]</sup>;Halford等人利用相变材料的蓄能特性,对用电起到削峰填谷的作用,制冷期间能将负荷峰值降低19%~57%<sup>[6]</sup>;Kuznik等人通过实测发现由于相变墙的辐射效应和空气温度,室内舒适度有明显改善<sup>[7]</sup>;张寅平等利用定型相变材料作为蓄热地板,进行了太阳能采暖测试,并利用建立的理论模型进行模拟计算<sup>[8]</sup>;康艳兵等人利用相变储能技术结合夜间通风提出一种新型的堆积床式相变吊顶系统(NVP),白天室温平均可低3℃,降温效果明显<sup>[9]</sup>;冯国会等人对相变房间的实

测表明在夏季温差较大地区可充分利用夜间通风冷量提高日间室内热舒适性,并且结合可峰谷电价政策降低峰值负荷,缓解电网压力<sup>[10]</sup>。通过已有研究发现,无论是建筑节能、室内热环境还是经济效益方面,相变材料在建筑中的应用都有很大前景,值得更多深入研究。

### 2.2 本文研究对象

随着人口增长以及城市化进程的加快,住宅建筑节能成为重要的节能途径之一,在此背景下,美国能源部在2002年起主办了国际太阳能十项全能竞赛(Solar Decathlon,下文简称SD),是一个以全球高校为参赛单位的太阳能建筑科技竞赛,被誉为“太阳能建筑领域的奥运会”。竞赛要求每个参赛队设计、建造并运行一座功能完善、舒适、体现可持续的零能耗太阳能住宅——全年能源消耗均为零的住宅建筑,其独立于能源网络,所用能源均由太阳能产生。SD竞赛作品融合了技术创新和设计创意,极具研究价值。本文即以历届SD竞赛作品为例,着眼于相变材料在建筑中的应用方法,对14个应用相变材料的参赛作品进行深入研究,并将其整理归纳为表1,以期对建筑节能设计起到一定的借鉴作用。

## 3 相变材料在SD竞赛中的应用研究

相变材料在建筑中的应用模式主要可分为被动式和主动式应用两类。被动式应用主要利用空气温度变化、太阳能辐射直接或间接得热、自然通风等方式自发蓄能或释能;主动式应用则主要依靠辅助的机械动力来蓄能或释能。由于被动式应用的效果很大程度上取决于外界环境因素,使用机械动力的主动式应用能使相变材料更充分地被控制利用,但设计也更为复杂。

### 3.1 被动式应用

被动式应用主要将相变材料作为独立构造层或者与其他材料结合来使用,其较大的潜热值能使轻型围护结构建筑拥有更好的热稳定性,大大减少室内温度波幅,在提高热舒适度的同时降低空调负荷。

#### 3.1.1 相变材料作为独立构造层

(1) 相变材料应用于吊顶:在TEAM EHU的参赛作品Ekihouse中(SDE2012)(SD\*\*表示于美国举办,SDE\*\*表示于欧洲举办,SDC\*\*表示于中国举办,数字代表竞赛年份),其吊顶使用玻璃棉保温材料,在石膏板面向室内侧设置相变材料,厚度为5mm,具体构造如图1所示。将相变材料应用于吊顶较其他位置能够有更大的换热面积,但是由于热压原因,放热时对流换热相对较小,应用时也可以考虑增加风机等方法来加强对流换热系数。

表1 SD 竞赛作品中相变材料的应用情况

赛队	作品名称	建筑外观	应用模式	应用方法	设置位置	相变温度/℃
安大略联 SD2009	North House		被动式	相变材料作为独立一层置于地板	地板	22~24
宾尼法尼亚州立大学 SD2009	Natural Fusion		被动式	相变材料作为独立一层置于屋顶和外墙	吊顶、外墙	23
达姆施塔特工业大学 SD2009	surPLUShome		主动式	相变通风系统利用外界夜间空气冷量蓄冷	吊顶	26
斯图加特应用技术大学 SDE2010	home +		被动式	相变材料以微胶囊封装形式置于外墙	外墙	26
			主动式	相变材料用于夜间辐射冷却系统蓄冷以水为媒介	吊顶	22
同济大学 SD2011	Y-container		被动式	相变材料置于吊顶集热空间蓄热,作为缓冲空间并促进热压通风	吊顶	50
巴斯克地区大学 SDE2012	Ekihouse		被动式	相变材料置于吊顶室内侧蓄能	吊顶	22
以色列特拉维夫大学 SDC2013	14E House		主动式	相变材料用于夜间辐射冷却系统蓄冷以水为媒介	屋顶	18
西安建筑科技大学 SDC2013	栖居		被动式	相变材料用塑料管封装于南墙蓄能	外墙	-
BE-MA-NY 赛队 SDC2013	Solatrium		被动式	相变材料添加于地砖中蓄能	地板	23
布加勒斯特技术大学 SDE2014	EFdeN		被动式	相变材料以微胶囊封装形式与石膏板结合	内墙、外墙	23
加州州立理工大学 SD2015	Inhouse		主动式	相变通风系统利用外界夜间空气冷量蓄冷	吊顶	22

注: 图片来源于各参赛队 Manual 手册。

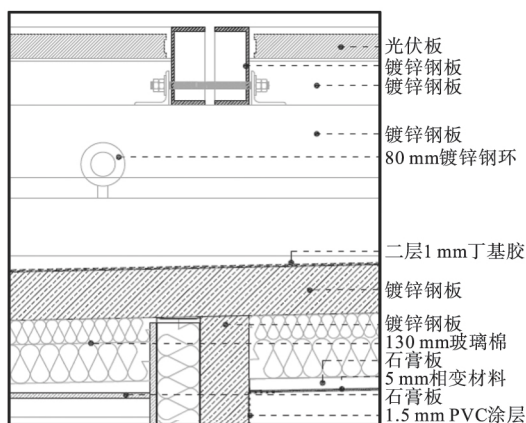


图1 Ekishouse 中的屋顶构造

(注:根据 EHU 队 Manual 手册资料改绘)

(2) 相变材料应用于阳光间:在 TEAM Tongji 的参赛作品 Y-container 中(SD2011),设计了一种新型的热压通风系统,在房子中部的屋面上方,利用相变材料设置了一个玻璃顶的小空间作为集热空间。在集热间内放置相变点温度为  $50^{\circ}\text{C}$  的相变材料,在白天阳光充足时能将空间温度维持在  $50^{\circ}\text{C}$  左右,与  $20^{\circ}\text{C}$  左右的室内形成很大的温度差,热空气向上通过集热间上部的风口排出室外,带动室内空气通过屋面上的风口进入集热间内,形成热压通风;夜间,相变材料持续放热,维持集热间内的温度,保持热压通风的效果。不同季节通过对通风口的开闭设置,以达到热舒适要求的同时也能减少能耗,如图2所示。

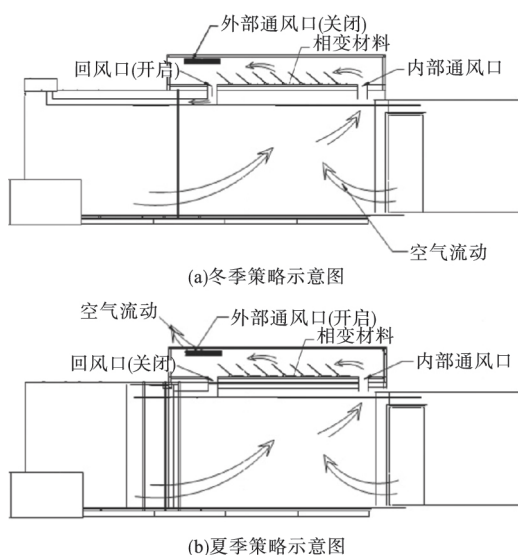


图2 Y-container 中的通风调节系统

(注:根据 Tongji 队 Manual 手册资料改绘)

### 3.1.2 相变材料与其他材料结合

(1) 相变材料与地砖/聚丙烯板结合应用于地面:在 TEAM BE-MA-NY 的参赛作品 Solatrium 中(SDC2013),其地板使用纤维复合材料,上铺添加相变材料的地砖,能自动储存和释放热量,调节室内温

度。在空调制冷季节时,白天将热量储存并在夜晚凉爽时释放热量,从而使房屋整体保持恒定舒适的温度;在采暖季节,相变材料置于地板的优势在于能同时通过室内空气和阳光直射蓄热。但需要注意应尽可能地减小地板热阻,因为热阻大会降低相变材料储存热量的效率,可以通过尽量减小空气间层厚度、挑选热阻小的材料或者深色的材料作为地板面层,以增大传热系数。

在 TEAM Ontario Canada 的参赛作品中(SD2009),将相变材料与聚丙烯板掺混,敷设在地板下,但由于其选择了浅色的枫木地板(较陶瓷等材料热阻更大),并且不能吸收太阳直接辐射,热传递的数量和速率都有一定程度上的降低,导致相变材料不能有效地吸热放热,蓄能效果未能最大化。

(2) 相变材料与石膏板结合应用于墙体:在 TEAM ROMANIA 的参赛作品 EFdeN 中(SDE2014),相变材料以微胶囊的形式与石膏板结合,分别应用于外墙和内墙,在约  $150\text{ m}^2$  的墙体中应用了相变材料,占了全部墙体面积的 71%,剩余的部分用了复合板和普通石膏板。微胶囊相变材料与石膏板结合的形式因为增大了换热面积,相较整体封装的材料加快了热交换,使蓄能效率更高,模拟显示其能在一年中减少 16.72% 的制冷能耗<sup>[11]</sup>。相同的应用形式之前还出现在 TEAM GERMANY 的参赛作品中(SD2009)。

### 3.2 主动式应用

主动式应用中相变材料除了以独立构造层以及与其他材料结合的形式出现外,放置于容器内的形式也较常见。相变材料多与空调系统、热电冷联供系统、废热利用、PVT 系统等结合以提高能源使用效率,其主要的换热媒介为空气和水。

#### 3.2.1 相变材料利用空气作为换热媒介

(1) 相变材料应用于地板/吊顶,利用夜间通风换热:在 TEAM XIAU 的参赛作品 SUNNY INSIDE 中(SDC2013),其中庭地板下埋设了 4 根风管,外面包覆保温棉,每根风管内用不锈钢架挂装铝箔袋包装的相变材料,相变点温度为  $23^{\circ}\text{C}$ ;客厅吊顶上的相变材料通风管,内装不锈钢管包装的相变材料,相变点温度为  $18^{\circ}\text{C}$ 。两种不同相变点温度的材料配合使用,适应室内温度控制的严格要求。室内和室外分别设置了 2 个风口,每个风口处设置 1 个电动风阀,用于控制风管的不同通风模式,如图3所示。在夏季夜间关闭室内风阀,开启室外风阀,利用夜间室外的冷空气为相变材料降温蓄热;白天关闭室外风阀,开启室内风阀,利用夜间蓄积的冷量为室内降温,减少空调能耗。

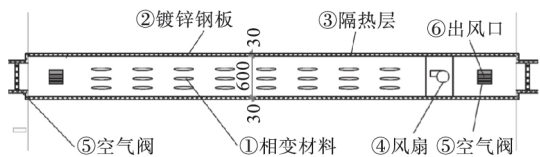


图3 SUNNY INSIDE 中的相变通风系统(作者自绘)

在 TEAM Cal Poly 的参赛作品 INhouse 中 (SD2015) 也采用了类似的主动式应用。放置在吊顶中的风管截面尺寸为 300 mm × 300 mm ,分别设置 4 个进排气口用于室内循环通道和室外夜间通风冷却循环通道 ,同时还配置了 250 mm 的内联风机以加强换热效果 ,提高蓄能效率 ,如图 4 所示。

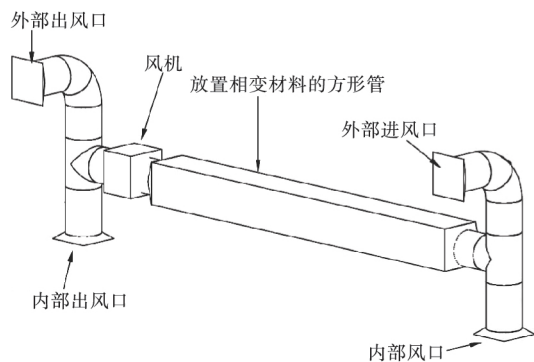


图4 INhouse 中的相变通风系统

(注:根据 Cal Poly 队 Manual 手册资料改绘)

(2) 相变材料与光伏热系统 (PVT) 结合 ,通过空气换热:在 TEAM UOW 的参赛作品 Illawarra Flame

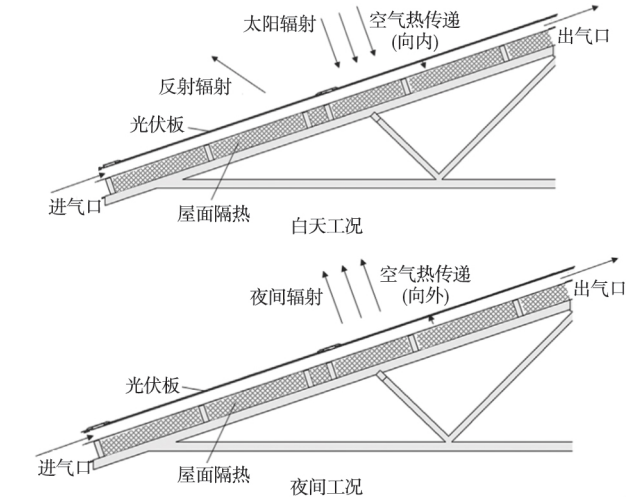
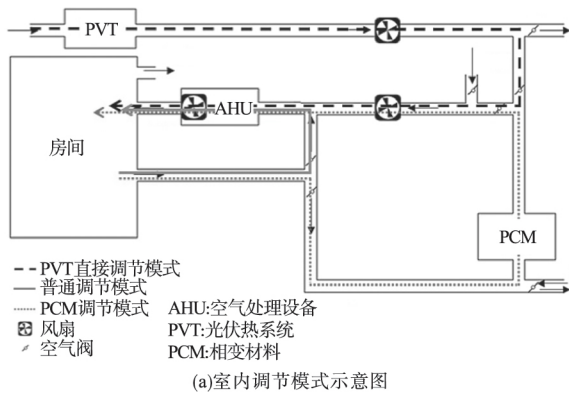


图5 Illawarra Flame 中的屋顶构造(根据文献[13]图片改绘)

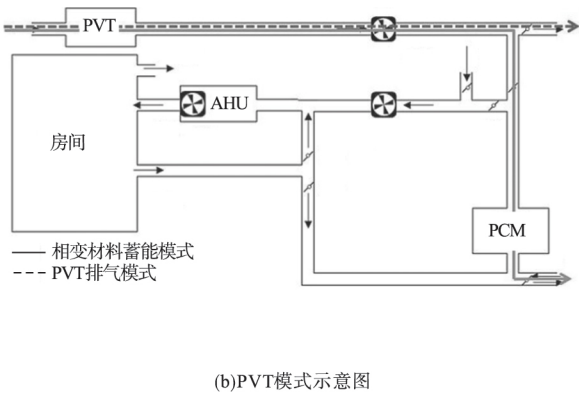


图6 Illawarra Flame 空调系统工作模式(根据文献[13]图片改绘)

表2 Illawarra Flame 光伏热系统工作模式

工作模式		何时启用
室内调节模式	PTV 直接调节模式	当 PVT 白天产热或者夜间制冷时 ,室内恰好需要供给 若 PVT 供给不足则由 AHU 补充
	相变材料调节模式	当相变材料蓄能充足时 ,室内空气经过相变材料调节温 若 PCM 供给不足则由 AHU 补充
	普通调节模式	当 PVT 和相变材料都不能供给时 ,则由 AHU 供给全部热量或冷量
PVT 模式	相变材料蓄能模式	当室内不需要供给时 ,利用 PVT 给相变材料蓄能
	PVT 排气模式	当室内不需要供给时 ,且相变材料蓄能充足时 利用风扇直接将空气排向室外 ,降低板下温度 ,利于发电



### 3.2.2 相变材料利用水作为换热媒介

(1) 相变材料应用于空调系统,通过水换热:在 TEAM CEU 的参赛作品 SMLsystem 中(SDE2012)的空调系统是基于传统的水源热泵,利用相变材料设置了蓄冷箱和蓄热箱来提高空调系统的效能,相变温度分别是 10 °C 和 27 °C。

该系统中的热泵利用晚上的低温来冷却蓄冷箱,白天便可不启动热泵,使系统具有较高的 COP。蓄冷

箱的第二个作用是当室温达到设定温度后,热泵继续工作,对蓄冷箱进行蓄冷,之后可用蓄冷箱的冷量来维持室温。这样能够减少热泵的关闭/开启次数,从而减少能耗,延长设备的使用寿命。

蓄热箱的主要作用是当室外温度较高时,维持热泵换热水槽的温度基本恒定,以提高系统的 COP。到晚上室外温度低于相变温度时,通过排风扇给蓄热箱散热,如图 7 所示。

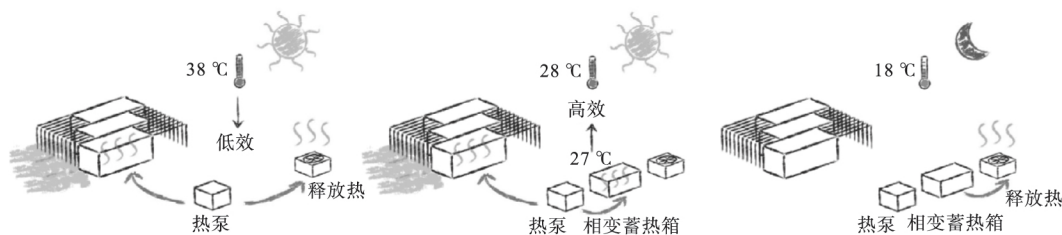


图 7 SMLsystem 中相变蓄热箱工作示意图(根据文献[14]图片改绘)

(2) PCM 结合夜间长波辐射,通过水换热:在 TEAM ISRAEL 的参赛作品 living patio 中(SDC2013)同样将 PCM 运用于空调中,并且使用了一种夜间辐射冷却系统,在房屋北侧屋面上设置水辐射盘管,在夜间可利用天空长波辐射冷却的效应,开启循环水泵用于制取冷水并收集到冷水箱中。在该系统中使用了两个相变材料储能箱用于蓄积冷量,制得的 15 °C 左右的冷水被通入箱中,与相变点温度 18 °C 左右的相变材料换热,储存冷量以供白天空调系统使用。

在 TEAM SUAS 的参赛作品 home + 中(SDE2010),采用的 PVT 系统结合了相变材料和夜间辐射冷却系统。在夜晚,PVT 系统首先(第一阶段)利用太空辐射冷却水并储存在室内吊顶中的 PCM 中直接给室内降温,其次,多余的冷能储存在冷水箱中(第二阶段),在白天通过地板辐射为室内降温,如图 8 所示。

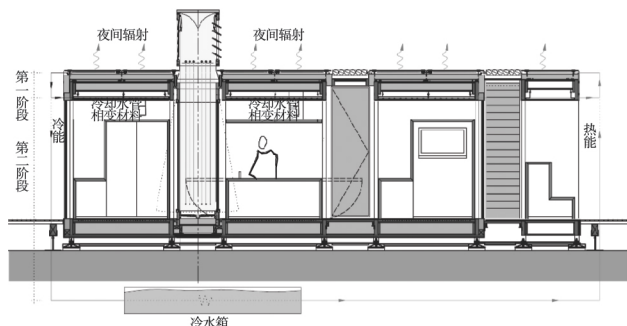


图 8 home + 中相变材料结合夜间长波辐射的原理示意图  
(根据 SUAS 队 Manual 手册资料改绘)

## 4 结论

通过对历届 SD 竞赛中应用相变材料的参赛作品进行分析,本文将相变材料应用于建筑中的模式分为

两种:被动式应用和主动式应用。被动式应用中相变材料可作为独立构造层或者与围护结构材料结合;主动式应用中相变材料主要利用空气和水作为换热媒介。通过上述分析,可得到以下结论:

(1) 被动式应用的效果更多体现在减小室内温度波幅、增加热稳定性、降低负荷峰值以及改善室内热舒适性,能够使轻型建筑“重型化”,设计时应该考虑利用环境因素来最大化相变材料的使用效果,如自然通风、太阳直射辐射、夜间辐射制冷等。TEAM ROMANIA 的参赛作品 EFdeN 即采用了被动式应用模式,一年中可减少 16.72% 的制冷能耗<sup>[11]</sup>,节能效果显著。

(2) 主动式应用主要优点是能够进行人为控制,利用机械系统更充分高效地使用相变材料,并且能够结合其他建筑设备协同工作,是实现绿色可持续建筑的有效技术手段。TEAM CEU 的参赛作品 SMLsystem 将相变材料与空调结合以提高系统工作效率,结果显示可实现 18.97% 的能耗节省<sup>[12]</sup>。

(3) 无论是被动式还是主动式应用,在建筑中应用相变材料时我们不能忽视对当地气候、建筑特性、建筑用途等的考虑,以此来选择合适的相变温度、包装形式、应用位置等,发挥相变材料最佳的效用。

### 参考文献:

- [1]CABEZA L F,CASTELL A,BARRENECHE C,et al. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011,15(3):1675-1695.
- [2]FARID M M,KHUDHAIR A M,RAZACK S A K,et al. A review on phase change energy storage: materials and applications [J]. Energy Conversion and Management 2004,45(9-10):1597-1615.

(下转第 84 页)

装便捷、造价低廉,这也是被动式阳光间在建筑节能市场备受青睐的另一个主要原因。

建筑采取热压风压的原理通风,风压作用原理是由于冷热空气的不均造成一定的压力差,进而使空气流动,主要是热空气上流、冷空气下流。主要的压力差产生于迎风面的正压区与被风面的负压区,而气流就是在二者之间流动。利用风压通风最主要的是形成“穿堂风”。

同时,本项目在能源利用方面采用绿色生态技术辅助主动式设计手段,如可再生能源太阳能光伏板、太阳能集热器、风力发电机、雨水收集系统、新风热交换系统等共同作用下实现草原建筑的生态低能耗、为室内提供舒适的热湿环境和空气质量。实现可持续的设计理念,达到节能减排的目的。

## 5 结论

(1) 本建筑设计中的绿色节能主要通过被动式设计手法,从草原聚落建筑的形体构成、结构选型以及室内空间入手,合理布置建筑物的方位。并结合被动式阳光间、热压风压原理实现建筑节能。同时,利用绿色生态技术通过主动式手段设计能源利用系统。

(2) 该设计解决了草原地区牧民居住建筑保温隔热性能差和室内空气质量差等问题,以及结构笨重且不能灵活的分割空间等问题,提高了牧民生产生活质量。

(3) 本建筑设计以人、自然、建筑协调发展为目

的,将建筑节能设计理念融入设计中。同时,通过对传统技术进行改良并结合科学的理论分析应用于草原聚落空间中,实现节能减排。

(4) 内蒙古草原作为中国最大的牧场,它的潜在使用价值很强,并且也有很大的研究价值。结合近几年节能生态环保建筑的迅速发展,草原生态聚落合理的功能区域划分和对自然能源的充分应用等热点问题的分析,可以得出该设计对提升草原的利用率、解决草原生态问题起到关键性作用,并且具有较大的推广应用空间。

## 参考文献:

- [1]高利芳. 内蒙古牧民合作社参与草原生态保护研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.
- [2]刘加平. 传统民居生态建筑经验的科学化与再生[J]. 中国科学基金, 2003, 4(4): 44-46.
- [3]徐至钧, 赵尧钟. 绿色建筑当前的发展与展望[J]. 建筑技术, 2012, 43(4): 300-304.
- [4]马维娜, 梅洪元, 俞天琦. 我国绿色建筑技术现状与发展策略[J]. 建筑技术, 2010, 41(7): 641-644.
- [5]金虹, 邵腾. 严寒地区乡村民居节能优化设计研究[J]. 建筑学报, 2015, 5(1): 218-220.

作者简介: 谢庄秀(1996),女,内蒙古赤峰人,主要从事建筑设计方面研究工作(1509501943@qq.com)。

通讯作者: 许国强(1979),男,内蒙古赤峰人,硕士,讲师,主要从事建筑节能的研究工作(598101085@qq.com)。

(上接第40页)

- [3]TYAGI V V, BUDDHI D. PCM thermal storage in buildings: a state of art[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11(6): 1146-1166.
- [4]ZHU N, MA Z, WANG S. Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: a review[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(12): 3169-3181.
- [5]Belén Zalba, José M. Marín, Luisa F. Cabeza, et al. Free-cooling of buildings with phase change materials[J]. Int J Refrig, 2004, 27(8): 839-849.
- [6]HALFORD C K, BOEHM R F. Modeling of phase change material peak load shifting[J]. Energy and Buildings, 2007, 39(3): 298-305.
- [7]Frédéric Kuznik, Joseph Virgone, Kevyn Johannes. In-situ study of thermal comfort enhancement in a renovated building equipped with phase change material wallboard[J]. Renewable Energy, 2011, 36(5): 1458-1462.
- [8]Yinping Zhang, Xu Xu, Hongfa Di, et al. Experimental study on the thermal performance of the shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings[J]. J Sol Energy Eng, 2006, 128(2): 255.
- [9]康艳兵, 江亿, 张寅平. 夜间通风相变储能吊顶系统实验分析[J].

建筑学报, 2002, 7(7): 32-34.

- [10]冯国会, 曹广宇, 于瑾, 等. 夏季昼夜温差较大地区相变墙蓄冷可行性分析[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2005, 4(4): 350-353.
- [11]Andrei-Stelian Bejan, TIBERIU Catalina, Adrian Traian Munteanu. Indoor environmental quality experimental studies in an energy-efficient building. case study: efdn project[J]. Energy Procedia, 2017, 112: 269-276.
- [12]REAL A, GARCÍA V, DOMENECH L, et al. Improvement of a heat pump based HVAC system with PCM thermal storage for cold accumulation and heat dissipation[J]. Energy & Buildings, 2014, 83: 108-116.
- [13]Fiorentini Massimo, Cooper Paul, MA Zhenjun, et al. Experimental investigation of an innovative HVAC system with integrated PVT and PCM thermal storage for a net-zero energy retrofitted house[J]. ASHRAE Trans, 2015, 121: 1-2.

作者简介: 石峰(1981),男,湖北人,毕业于华中科技大学,建筑学专业,博士,副教授,中国建筑学会会员,中国绿色建筑与节能委员会会员,主要研究方向:建筑节能设计与检测、建筑能耗模拟和环环境模拟(shifengx@126.com)。